Processos erosius als penya-segats costaners del SE de Mallorca (Illes Balears, Mediterrània Occidental): dades preliminars de l'erosió contínua per disgregació granular

Pau BALAGUER i Joan J. FORNÓS

SHNB

SOCIETAT D'HISTÒRIA NATURAL DE LES BALEARS

Balaguer, P. i Fornós, J.J. 2003. Processos erosius als penya-segats costaners del SE de Mallorca (Illes Balears, Mediterrània Occidental): dades preliminars de l'erosió contínua per disgregació granular. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 46: 37-50. ISSN 0212-260X. Palma de Mallorca.

Es presenten les dades preliminars sobre taxes anuals d'erosió contínua per disgregació granular als penya-segats calcaris i calcarenítics del Miocè Superior localitzats a les àrees de s'Alavern (Llucmajor) i Punta des Sabinar (Santanyí) del SE de Mallorca. La instal·lació, al peu dels penya-segats, de trampes de sediment per tal de recollir el material particulat alliberat per la disgregació granular ha permès avaluar les taxes de retrocés dels penya-segats per aquest tipus de procès erosiu. El seguiment del retrocés s'ha realitzat durant 379 dies dividits en 17 campanyes de mostreig. Les taxes mitjanes d'erosió obtingudes, que no han implicat en cap cas un canvi de fisionomia de les costes objecte d'estudi, han estat de 0,025 mm any^{-1} per a Punta des Sabinar i de 0,117 mm any^{-1} per a s'Alavern.

Paraules clau: *Illes Balears, erosió contínua, retrocés del penya-segat, disgregació granular contínua.*

EROSIVE PROCESSES AT EASTERN MALLORCA SEACLIFFS (ILLES BALEARS, WESTERN MEDITERRANEAN): EVALUATION OF EROSION RATES BY GRANULAR DISGREGATION, PRELIMINARY DATA. Preliminary continuous erosion annual rates, as granular disintegration, of the SE sea cliffs of Mallorca are presented. Two localities have been assessed, s'Alavern (Llucmajor) and Punta des Sabinar (Santanyí), both on Upper Miocene limestone and calcarenites. Eleven sediment traps have been installed at the cliff toe in order to log the amount of particulate material released by granular disintegration. Cliff retreat due to this kind of erosion process has been evaluated through seventeen monitoring campaigns, which represents a time span analysis of 379 days. The resulting mean erosion rate is 0.025 mm yr^{-1} at Punta des Sabinar, and 0.117 mm yr^{-1} in the case of s'Alavern site. These values and process do not represent in any case a significant change on the morphological aspect of the cliff.

Keywords: *Balearic Islands, continuous erosion, cliff retreat, granular disintegration.*

Pau BALAGUER i Joan J. FORNÓS, Dept. de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Cra. Valldemossa, km 7,5. Edifici Guillem Colom. 07122. Palma de Mallorca (Balears). e-mail Pau Balaguer: vdctpbh4@uib.es

Recepció del manuscrit: 13-març-03; revisió acceptada: 30-setembre-03.

Introducció

La importància creixent dels estudis del litoral, en el cas de les Balears, presenta un biaix cap a les costes baixes i d'acumulació (Corbí, 1990; Martín i Rodríguez-Perea, 1996; Servera, 1997; Servera i Martín, 1996; Servera i Rodríguez-Perea, 1996; Rodríguez-Perea *et al.*, 2000, entre d'altres), mentre que pocs estudis fan referència a les costes rocoses, les quals, en el nostre cas representen un percentatge lineal molt superior a les costes arenoses (80,63 % per a la costa rocosa front a un 9,38 % per a les costes d'acumulació i 9,99 % costes antropitrales modificades).

És dins dels estudis del litoral rocós, a part dels aspectes purament descriptius i morfogenètics, on l'estudi dels processos dinàmics tenen un pes específic important, en especial la contribució del seu resultat final que coincideix quasi bé sempre amb la seva modificació i, per tant, amb el seu retrocés.

El retrocés d'un penya-segat costaner està condicionat per la combinació dels processos d'origen marí i subaeri, que hi incideixen al damunt (Trenhaile, 1987; Sunamura, 1992). Aquests processos erosius de desmantellament dels penya-segats es poden separar en processos continus i discontinus (Marques, 1997).

Els processos d'erosió discontínua se solen organitzar amb episodis excepcionals en els quals té lloc l'alliberament de gran quantitat de material, amb volums de l'ordre de metres cúbics en un breu interval de temps (Marques, 1997). Aquests processos solen tenir una distribució aleatòria en el temps i es desencadenen quan hi ha una conjunció de tota una sèrie de factors i fenòmens tals com règim de precipitació, grau d'obertura de les fractures i rebliment de fractures per argiles (Erismann i Abele, 2001; Balaguer *et al.*, 2002). Els processos d'erosió contínua, tal i com el seu nom indica, es donen de forma seguida i persistent en el temps. L'erosió contínua dels penya-segats es diferencia de la discontínua o sobtada pel volum de sediment o material alliberat i per la variable temporal. Aquest tipus d'erosió es pot produir a partir de processos de meteorització física, química o biològica que, entre d'altres, afavoreixen la disgregació granular contínua. Les taxes d'alliberament de material són molt menors que en els procesos catastròfics, de l'ordre de mil.límetres cúbics (Marques, 1997; Villanueva *et al.*, 2000; Palmer *et al.*, 2001; Balaguer *et al.*, 2001; 2002).

L'alliberament continu de material te lloc a partir de l'acció combinada dels agents subaéris i marins (Blanco-Chao i Pérez-Alberti, 1996). Els processos marins afavoreixen, especialment durant els dies de fortes tempestes, la deposició de sals a la paret i, especialment, a l'interior de les microfractures dels penya-segats costaners, a la vegada que contribueixen a l'humitejament del penyal (Holmes,1998). Els principals factors subaeris són les precipitacions atmosfèriques i els canvis de temperatures. Les precipitacions participen activament en el rentat de les parets dels penya-segats, en l'humitejament dels materials i en l'increment de la càrrega hidràulica que ha de suportar el penya-segat. Les variacions tèrmiques tenen una gran influència en els processos d'expansió dilatació-contracció i en el creixement de cristalls de sals (Goudie i Viles, 1995, 1997).

Per tal d'avaluar el paper de la disgregació granular en el litoral rocós a partir d'aquest procés, s'ha desenvolupat un sistema de mostreig de material granular particulat per a quantificar la taxa d'erosió contínua que sofreixen els penya-segats costaners de Mallorca.

Marc físic de les àrees d'estudi

L'estudi de la disgregació granular contínua dels penya-segats s'ha dut a terme a les àrees de Punta des Sabinar (Santanyí) i s'Alavern (Llucmajor), localitzades a les costes del Llevant i Migjorn de Mallorca (Fig. 1) respectivament, on afloren els materials calcaris del Miocè Superior.

A la Punta des Sabinar, localitzada entre Cala Figuera i Cala Mondragó, la línia de costa està constituïda per penya-segats de perfil esglaonat d'altures compreses entre 20 i 25 m. La zona de s'Alavern es troba entre la urbanització de Vallgornera i Punta Plana i s'inserta dins d'un

tram de costa amb penya-segats d'altures compreses entre 15 i 20 m (Fig. 2a, b i c).

El rocam

Ambdues zones d'estudi presenten una seqüència estratigràfica pertanyent al Miocè Superior, gairebé idèntica; només presenten diferències pel que fa als materials localitzats a la part superior dels penya-segats estudiats.

La seqüència estratigràfica dels penya-segats de s'Alavern (Fig. 2a), s'inicia amb les calcarenites del Complex Terminal (Barón i Pomar, 1978; Pomar *et al.*, 1983) dites també Calcàries de Santanyí (Fornós, 1983). La seqüència general de les Calcàries de Santanyí es divideix en tres unitats; el complex de Manglar amb una potència d'uns 10 metres, el Complex Estromatolític Inferior amb una potència mitjana entre 1 i 2 metres i la Unitat Oolítica amb una potència mitjana d'uns 5 m. Sobre aquests, i amb contacte erosiu i discordant es disposen uns nivells Plio-quaternaris amb encrostaments calcaris i paleosòls amb una potència d'uns 5 m.

Els penya-segats de Punta des Sabinar estan formats per les calcàries i calcarenites del Miocè Superior (Fig. 2b i 2c), a la base es troben les calcàries esculloses corresponents amb la Unitat Escullosa (Barón, 1977) que arriben a assolir una gruixa mitjana de 3 m. A continuació, i amb un contacte erosiu, es disposen les calcare-

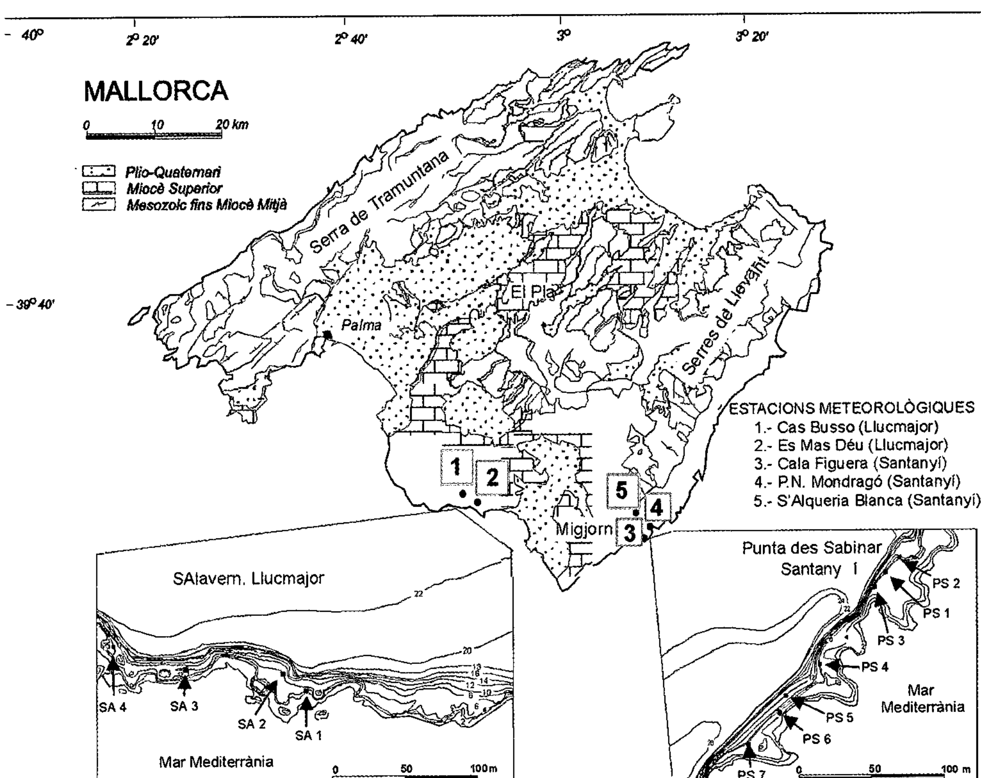


Fig. 1. Localització de les àrees d'estudi amb la distribució de les trampes de sediment. Tant la Punta des Sabinar com s'Alavern es troben a plataformes formades per les calcàries i calcarenites del Miocè Superior.

Fig. 1. Study sites and sediment trap distribution. Sa Punta des Sabinar and s'Alavern are located on a platform formed by sandstones and limestones from upper Miocene.

nites del Complex Terminal que en aquest sector presenten una potència mitjana d'uns 18 m. Les margocalcàries del Complex de Manglar assoleixen un gruix d'uns 10 m, el Complex Estromatolític Inferior té una potència d'entre 1 i 2 m i les calcàries oolítiques corresponents a la Unitat Oolítica, oscil·len entre 6 i 7 m de gruixa.

En aquest sector de costa són característics els paleocol.lapses de tipus càrstic, de cavitats localitzades dins de les calcàries esculloses, ocorreguts durant el Miocè Superior (Fornós, 1999; Fornós *et al.*, 1990; Ginés 2000; Robledo, 2001). El procés de col·lapse també afecta l'estructura dels nivells calcarenítics del Complex Terminal, donant lloc, puntualment, a nivells de bretxes. La trampa PS 2 està localitzada al peu d'un penyasegat afectat per aquest fenomen (Fig. 2b).

Agents climàtics

La distribució de la precipitació durant l'interval comprès entre els mesos de setembre de 2001 i 2002 presenta quatre màxims ben marcats (Fig. 3) a la segona quinzena de novembre, segona quinzena de març i principis d'abril, primera quinzena de maig i des de la segona quinzena de juliol fins a finals d'agost. L'histograma de precipitacions (Fig. 3) representa prou bé la irregularitat característica del clima mediterrani (Lluch i Dubón, 1997), amb períodes poc plujosos seguits d'altres amb altes taxes de precipitació.

Les dades de precipitació, recollides a les cinc estacions meteorològiques més pròximes a les àrees d'estudi (3 a Punta des Sabinar i 2 a s'Alavern), mostren grans diferències, malgrat la proximitat. A les de Punta d'es Sabinar, l'estació de l'Alqueria Blanca, amb 676 mm (Fig. 3), supera en més de 100 mm les precipitacions recolli-

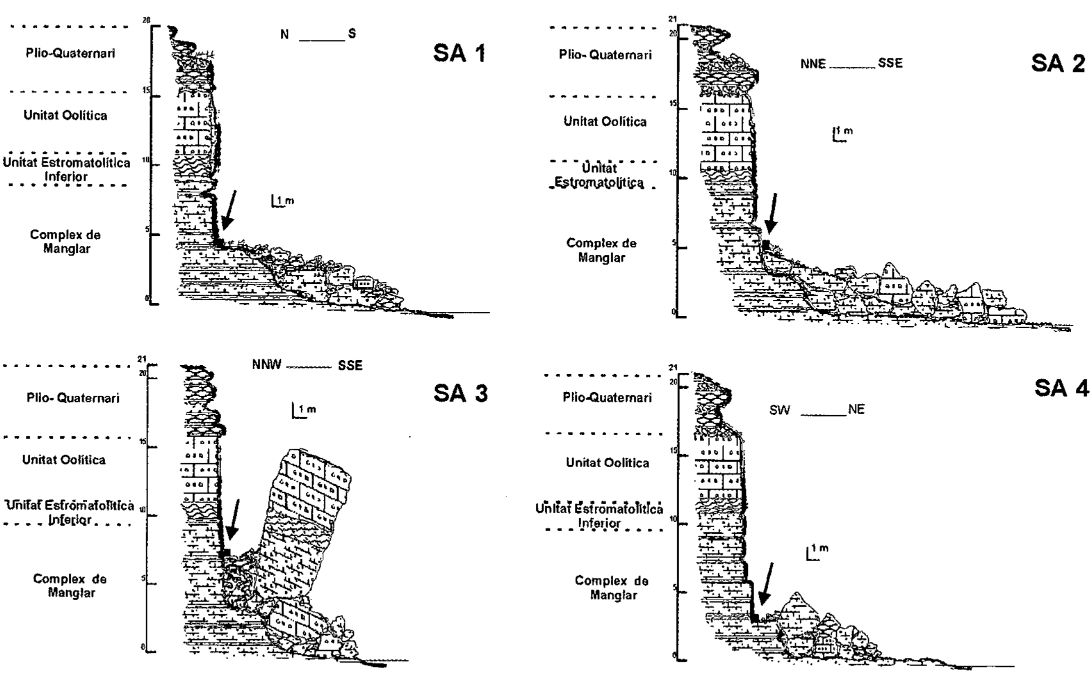


Fig. 2. A) Perfils topogràfics, columna estratigràfica i localització de les trampes de sediment (SA 1, SA 2, SA 3 i SA 4), de l'àrea d'estudi de s'Alavern (Llucmajor. Mallorca). La llegenda s'exposa a la Fig. 2c.
Fig. 2. A) *Topographic profiles, estratigraphic section and location of sediment traps (SA 1, SA 2, SA 3, SA 4), located at s'Alavern (Llucmajor. Mallorca). Legend at Fig. 2c.*

des a les estacions del Parc Natural de Mondragó (557,7 mm) i Cala Figuera (548 mm), localitzades a la línia de costa. També es presenten diferències entre les estacions pròximes a l'àrea d'estudi de s'Alavern (Fig. 3) on l'estació de Cas Busso (849 mm) supera en gairebé 200 mm la de Mas Déu (660 mm).

Les temperatures mitjanes, per al període 1960-1980 (Guijarro, 1986), per a les àrees de Punta des Sabinar i s'Alavern són de 17,8°C i 17,4°C respectivament. Durant els mesos més freds les temperatures mitjanes no són inferiors als 8,5°C a Punta des Sabinar i 7,4 °C a s'Alavern. Els mesos més calorosos, les temperatures mitjanes són de 29,7°C i 30,2°C a Punta des Sabinar i s'Alavern respectivament.

Les hores d'insolació que reben els penya-segats de les àrees d'estudi, depenen de la seva orientació. El grau o quantitat d'insolació rebuda influeix en la temperatura dels materials que els conformen (Holmer, 1998). Els penya-segats de Punta des Sabinar, amb una orientació SW-NE deixen de rebre la incidència directa del sol a partir de migdia. En canvi, els de s'Alavern, amb una orientació E-W, reben la màxima insolació a partir de migdia.

Mètode

Els estudis sobre la disgregació granular contínua s'han dut a terme a les costes espadades de s'Alavern (Llucmajor) i de Punta des Sabinar (Santanyí). La recollida del material particulat, que desprenen de forma gairebé contínua els penya-segats, s'ha realitzat mitjançant la utilització de trampes de sediment, col·locades al peu dels penya-segats objecte d'estudi, de la forma que es pot observar a la Fig. 4.

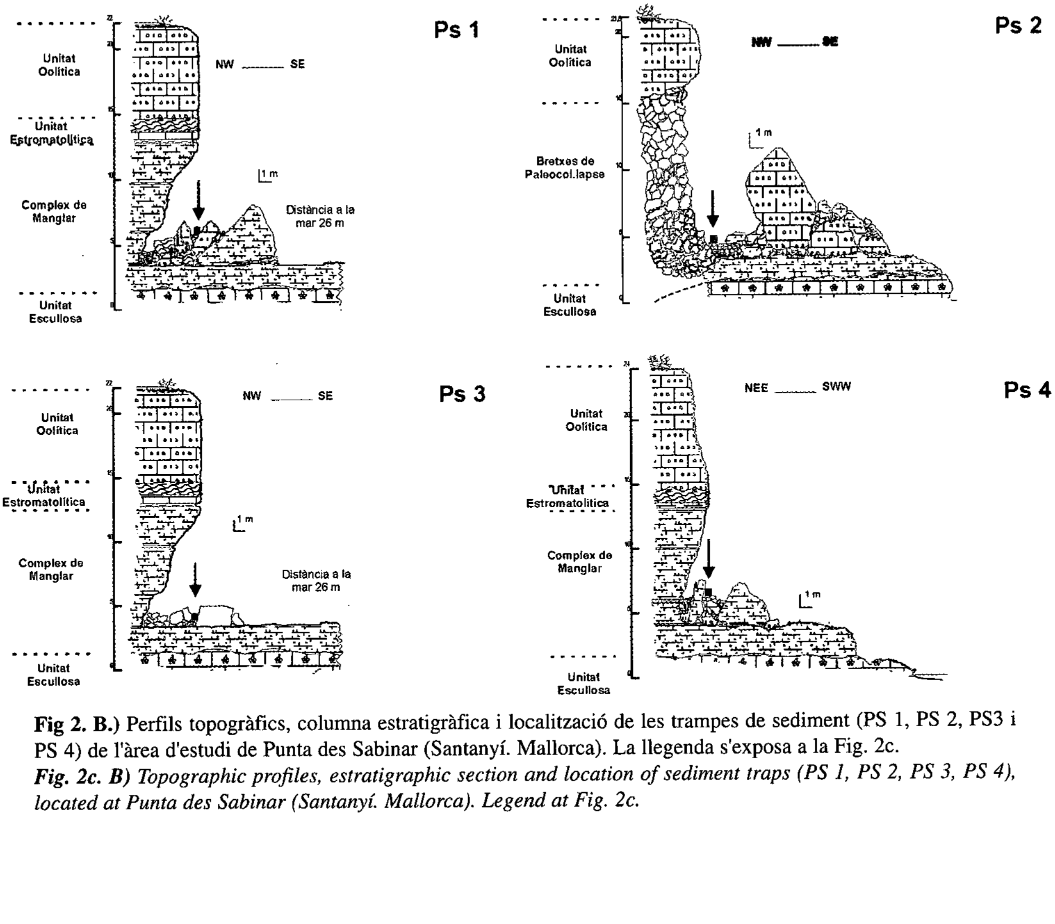


Fig 2. B.) Perfils topogràfics, columna estratigràfica i localització de les trampes de sediment (PS 1, PS 2, PS3 i PS 4) de l'àrea d'estudi de Punta des Sabinar (Santanyí. Mallorca). La llegenda s'exposa a la Fig. 2c.

Fig. 2c. B) *Topographic profiles, estratigraphic section and location of sediment traps (PS 1, PS 2, PS 3, PS 4), located at Punta des Sabinar (Santanyí. Mallorca). Legend at Fig. 2c.*

S'han instal·lat 11 trampes de sediment, 4 a l'àrea de s'Alavern i 7 a l'àrea de Punta des Sabinar. S'han distribuït de manera aleatòria al peu dels penya-segats calcaris que conformen les línies de costa d'ambdues àrees d'estudi. El mostreig s'ha realitzat durant el període comprès entre el 10 de setembre de 2001 i el 26 de setembre de 2002 (379 dies).

Les trampes de sediment utilitzades han consistit en uns recipients de PVC amb una obertura superior rectangular (30 cm x 24 cm) i una altura de 34 cm. La capacitat màxima d'aquests sistemes de mostreig de sediment és de 24.480 cm^3. Amb la finalitat de retenir els sediments més fins durant els dies de vent, a l'interior s'han instal·lat unes xarxes d'1 mm de diàmetre.

Les campanyes de recollida de sediment, per a ambdues àrees d'estudi, coincideixen el mateix dia. El buidatge de les trampes s'ha realitzat 17 vegades amb una periodicitat mitjana de 22 dies. El període més curt ha estat de 14 dies, entre el 13 i el 27 d'agost de 2002, i el període més llarg ha tingut 30 dies compresos entre el 27 d'agost i el 26 de setembre de 2002.

A partir del pes del material dipositat dins la trampa de sediment, les taxes de retrocés s'han obtingut mitjançant els següents càlculs:

$$P \;/\; d = V$$
$$V / S = TBR$$
$$TBR / T = TDR$$

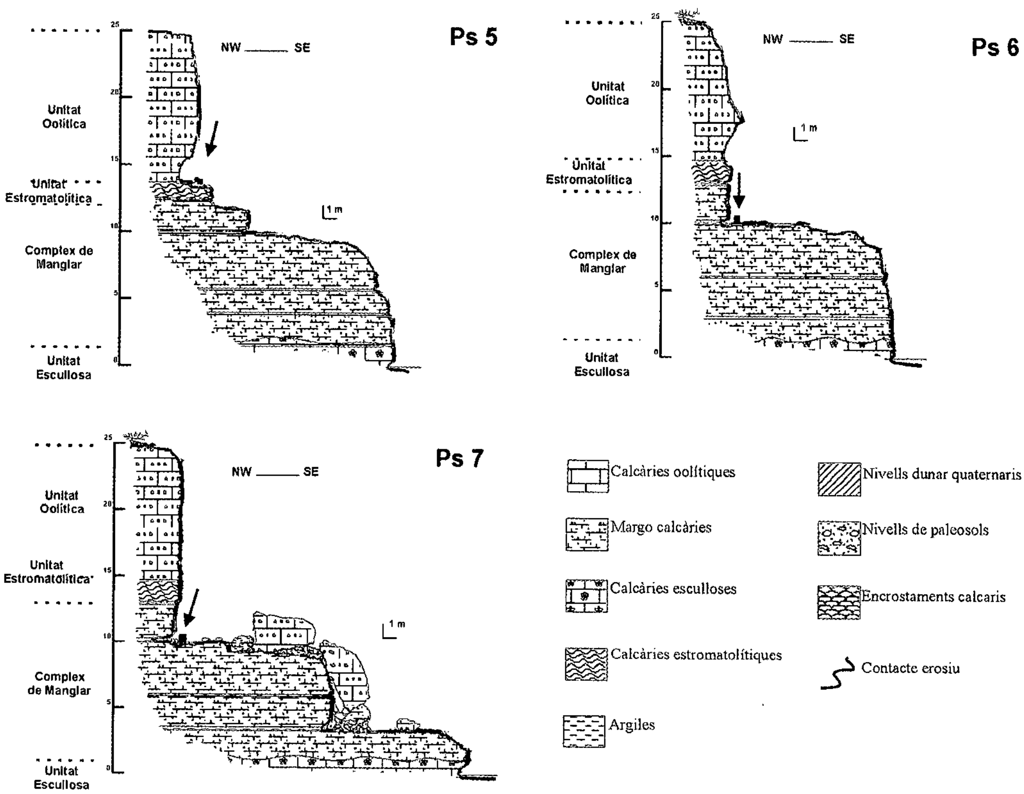


Fig 2. C.) Perfils topogràfics, columna estratigràfica i localització de les trampes de sediment (PS 5, PS 6 i PS7) de l'àrea d'estudi de Punta des Sabinar (Santanyí, Mallorca).

Fig. 2c. C) *Topographic profiles, estratigraphic section and location of sediment traps (PS 5, PS 6, PS 7), located at Punta des Sabinar (Santanyí, Mallorca).*

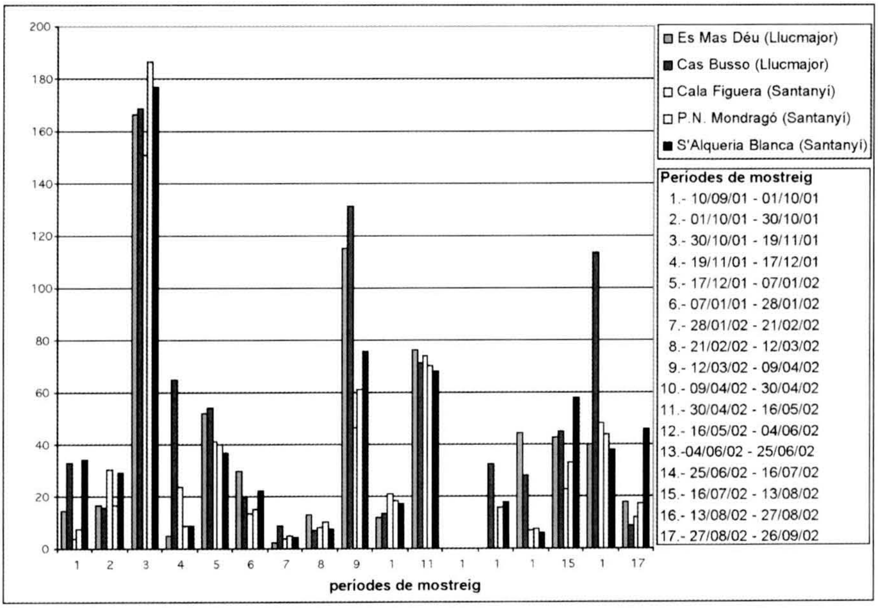


Fig. 3. Valors de precipitació per a cadascun dels 17 períodes de mostreig compresos entre el 10 de setembre de 2001 i el 26 de setembre de 2002.
Fig. 3. *Rainfall values for 17 sampling periods since 10th of september of 2001 till 26 th of september of 2002.*

- P és el pes de la mostra (g).
- d és la densitat de la roca estimada en 2,2 g/cm^3.
- V és el volum de material alliberat i S és la superfície afectada pel retrocés (cm^3).
- S és l'àrea mostrejada (cm^2) (Fig. 4).
- TBR és la taxa bruta de retrocés (cm).
- T és l'interval de temps transcorregut entre dues mesures (dies).
- TDR Taxa diària de retrocés (cm/dia).

Les superfícies de mostreig s'han establert a partir de la màxima altura de la trampa (30 cm) i de l'altura del penya-segat estudiat de la manera en la que es pot observar a la Fig. 4.

A partir de les TDR s'han extret els valors anuals de disgregació granular. Les dades obtingudes s'han relacionat amb el règim de precipitacions i amb la incidència dels temporals marins com a responsables de la deposició de sals a les parets dels penya-segats. També s'ha procedit a la caracterització textural del sediment recollit a les trampes i a les implicacions de les sals en el procés d'alliberament de material.

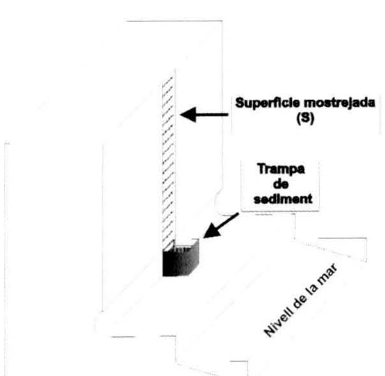


Fig. 4. Esquema de la localització de les trampes de sediment al peu dels penya-segats i la superfície mostrejada.
Fig. 4. *Location sketch of sediment traps at the cliff toe and sampled area.*

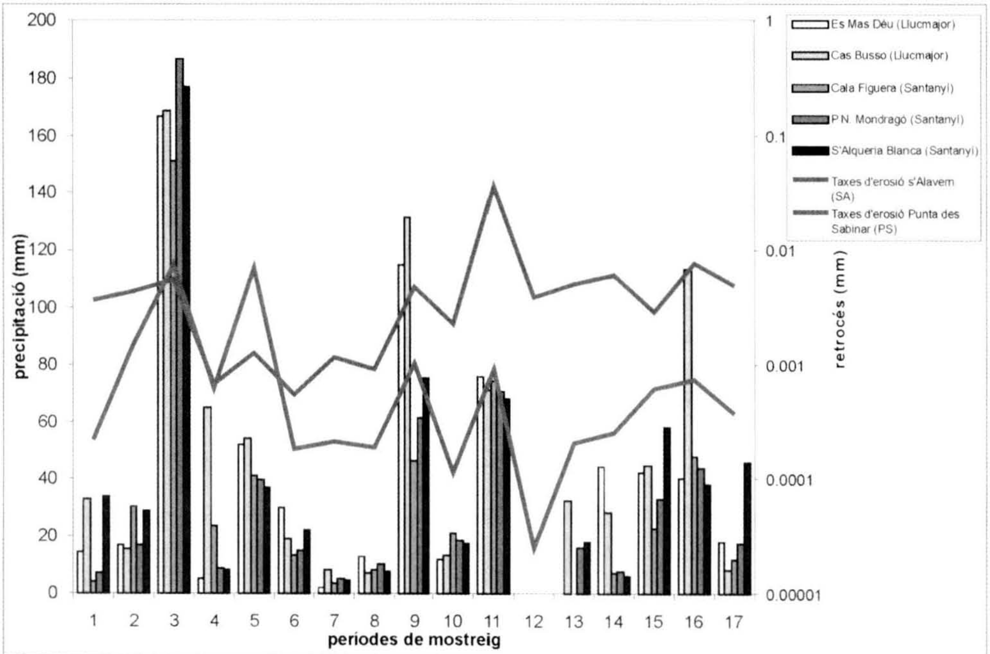


Fig. 5. Relació entre els valors de precipitació (mm) i taxes de mitjanes de retrocés (mm) per a cada un dels períodes de mostreig.
Fig. 5. *Relationship between rainfall values (mm) and mean erosion rates (mm) for every sampling periods.*

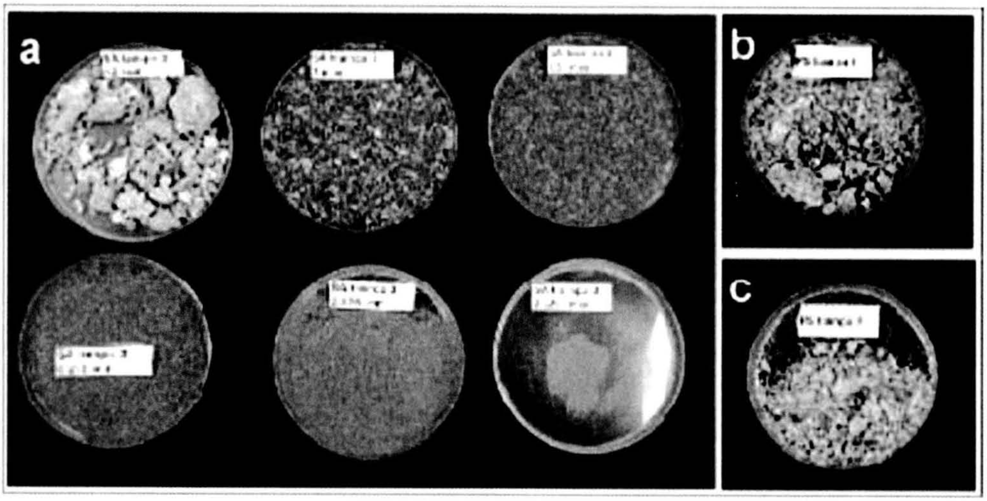


Fig. 6. Sediments recollits a les trampes SA 3 (a), PS 1 (b) i PS 7 (c), on queden paleses les diferències de textura, coloració i composició.
Fig. 6. *Aspect of sediment collected in sediment traps SA 3 (a), PS 1 (b) and PS 7 (c).*

En algunes de les campanyes les trampes han estat sustretes o bé desplaçades del seu emplaçament (-0- a les Taules 1 i 2). L'àrea de Punta des Sabinar ha sigut la més afectada. Les trampes PS 1, PS 2, PS 3, PS 4, PS 7 i SA 4 en són bon exemple (Taules 1 i 2).

Resultats

Taxes de retrocés

Les taxes de retrocés anual dels penya-segats de Punta des Sabinar (PS) oscil·len entre els 0,010 mm any $^{-1}$ i 0,065 mm any $^{-1}$. Les superfícies de mostreig a partir de les quals s'han calculat les taxes anuals de retrocés tenen una extensió de 34.100 cm^2 a PS 1 i PS 2, 35.200 cm^2 a PS 3, 36.300 cm^2 a PS 4, 19.800 cm^2 a PS 5 i 34.000 cm^2 a PS 6 i PS 7. Les taxes mitjanes de retrocés per a cada una de les trampes instal·lades a Punta des Sabinar són:

•La trampa PS1 reflexa un retrocés de 0,010 mm anual, amb els valors màxims durant octubre, novembre i juliol-agost. Els valors mínims els presenta durant setembre (2001), gener i febrer (Taula 1).

•La trampa PS 2 presenta un retrocés de 0,012 mm anuals; les majors taxes d'erosió s'enregistraren durant els mesos d'octubre, novem-

	PS 1	PS 2	PS 3	PS 4	PS 5	PS 6	PS 7	Mitjana intèrval PS	SA 1	SA 2	SA 3	SA 4	Mitjana intèrval SA
10/09/01 01/10/01	0.00013	0.00010	0.00040	0.00019	0.00007	0.00010	0.00075	**0.00025**	0.00246	0.00062	0.00913	0.00436	**0.00414**
01/10/01 30/10/01	0.00120	0.00063	0.00080	0.00082	0.00042	0.00109	0.00716	**0.00173**	0.00299	0.00274	0.01316	0.00132	**0.00505**
30/10/01 19/11/01	0.00360	0.00620	0.00722	0.00589	0.00758	0.01170	0.01714	**0.00593**	0.0016	0.00119	0.01972	0.00308	**0.00640**
19/11/01 17/12/01	0.00025	0.00190	0.00034	0.00084	0.00070	0.00026	0.00065	**0.00070**	0.00038	0.0002	0.00209	0.00047	**0.00078**
17/12/01 07/01/02	0.00032	0.00062	0.00256	0.00049	0.00102	0.04322	0.00775	**0.00800**	0.00069	0.00022	0.00428	0.00047	**0.00142**
07/01/02 28/01/02	0.00007	0.00036	0.00011	0.00010	0.00014	0.00003	0.00066	**0.00021**	0.00029	0.0002	0.00183	0.00018	**0.00062**
28/01/02 21/02/02	0.00010	0.00006	0.00019	0.00006	0.00046	0.00002	0.00121	**0.00030**	0.00076	0.00022	0.00427	0	**0.00131**
21/02/02 12/03/02	0.00037	0.00010	0.00017	0.00015	0.00016	0.00012	0.00043	**0.00021**	0.00064	0.00011	0.00318	0.00026	**0.00105**
12/03/02 09/04/02	0	0	0.00262	0.00273	0.00121	0.00165	0	**0.00205**	0.00752	0.00028	0.01335	0.00062	**0.00544**
09/04/02 30/04/02	0	0.00015	0.00014	0.00008	0.00031	0.00023	0	**0.00018**	0.00144	0.00084	0.00598	0.00197	**0.00256**
30/04/02 16/05/02	0	0	0	0	0.00186	0.00529	0	**0.00367**	0.00895	0.0007	0.15149	0.00325	**0.04109**
16/05/02 04/06/02	0	0.000041	0.000054	0	0.000505	0.000056	0	**0.00016**	0.00053	8.5E-05	0.01657	0.00065	**0.00445**
04/06/02 25/06/02	0.00035	0.00020	0.00008	0.00033	0.00020	0.00012	0.00036	**0.00023**	0.00122	0.0003	0.0207	0.00067	**0.00572**
25/06/02 16/07/02	0.00064	0.00020	0.00032	0.00032	0.00009	0.00011	0.00034	**0.00029**	0.0017	0.00063	0.0239	0.00125	**0.00686**
16/07/02 13/08/02	0.00110	0.00032	0.00015	0.00084	0.00125	0.00022	0.00105	**0.00071**	0.00142	0.00062	0.01029	0.00071	**0.00326**
13/08/02 27/08/02	0.00170	0.00042	0.00012	0.00110	0.00019	0.00047	0.00177	**0.00082**	0.00821	0.00161	0.01931	0.05714	**0.02156**
27/08/02 26/09/02	0.00039	0.00044	0.00035	0.00059	0.00035	0.00031	0.00056	**0.00043**	0.01329	0.0003	0.00799	0.00101	**0.00564**
Taxa anual trampa	**0.01022**	**0.01173**	**0.01561**	**0.01452**	**0.01649**	**0.06500**	**0.03983**		**0.05409**	**0.01087**	**0.32724**	**0.07740**	

Taxa mitjana de retrocés anual PS: 0.0247 mm any -1

Taxa mitjana de retrocés anual SA: 0.1174 mm any -1

Taula 1. Valors obtinguts i càlculs de taxes de retrocés anuals de les trampes instal·lades a sa Punta des Sabinar (PS) i s'Alavern (SA), per a cada un dels períodes de mostreig i taxa mitjana de retrocés anual. Els períodes amb valor zero no s'han comptabilitzat a l'hora de realitzar les mitjanes.

***Table 1.** Mean erosion anual rates calculated since sediment collected in sediment traps installed at sa Punta des Sabinar (PS) and s'Alavern (SA). Sampling periods with zero have not been counted to calculate arithmetic mean.*

bre, desembre i agost. En canvi els valors mínims s'han enregistrat durant els mesos de febrer i juny (Taula 1).

•La trampa PS 3 mostra un retrocés de 0,016 mm anuals i les majors taxes d'erosió es distribueixen durant els mesos de novembre i abril. Pel que fa a les taxes de retrocés més baixes, tenen lloc durant els mesos de maig i juny (Taula 1).

•La trampa PS 4 té una taxa d'erosió anual de 0,014 mm any^{-1}. Les taxes de retrocés més elevades es distribueixen durant els mesos de novembre i agost, i les més baixes es distribueixen durant els mesos de gener, febrer i abril (Taula 1).

•La trampa PS 5 presenta una taxa mitjana de retrocés de 0,016 mm any $^{-1}$, es dóna un major retrocés durant els mesos de novembre i maig, en canvi les taxes més baixes es donen durant els mesos de febrer i maig-juny (Taula 1).

•La trampa PS 6, és la que presenta la taxa de retrocés més alta amb 0,065 mm any^{-1}. Les majors taxes d'erosió es distribueixen durant els mesos de novembre, desembre i maig; en canvi, les taxes d'erosió presenten els valors més baixos durant els mesos de gener i juny (Taula 1).

•La trampa PS 7 presenta una taxa de retrocés moderada de 0,040 mm any^{-1}, amb els majors valors durant novembre i desembre i les menors durant juny i juliol (Taula 1).

Les taxes de retrocés anual dels penyasegats de la zona d'estudi de s'Alavern (SA), oscil·len entre 0,011 mm any^{-1} i 0,3 mm any . Les superfícies de mostreig de les trampes tenen una

	PS 1	PS 2	PS 3	PS 4	PS 5	PS 6	PS 7	Mitjana Intèrval PS	SA 1	SA 2	SA 3	SA 4	Mitjana Intèrval SA
10/09/01 01/10/01	5.6E-06	4.3E-06	1.8E-05	8.7E-06	3.1E-06	4.6E-06	3.4E-05	**0.000011**	0.00011	2.8E-05	0.00042	0.0002	**0.000189**
01/10/01 30/10/01	4.1E-05	2.2E-05	2.7E-05	2.8E-05	1.4E-05	3.8E-05	0.00025	**0.00006**	0.0001	9.4E-05	0.00045	4.6E-05	**0.000174**
30/10/01 19/11/01	0.00018	0.00031	0.00036	0.00029	0.00038	0.00059	0.00086	**0.000424**	8E-05	6E-05	0.00099	0.00015	**0.00032**
19/11/01 17/12/01	9E-06	6.8E-05	1.2E-05	3E-05	2.5E-05	9.3E-06	2.3E-05	**0.000025**	1.4E-05	7.1E-06	7.5E-05	1.6E-05	**0.000028**
17/12/01 07/01/02	1.5E-05	3E-05	0.00012	2.3E-05	4.9E-05	0.00206	0.00037	**0.000381**	3.3E-05	1.1E-05	0.0002	2.2E-05	**0.000067**
07/01/02 28/01/02	3.4E-06	1.7E-05	5E-06	4.8E-06	6.7E-06	1.4E-06	3.1E-05	**0.00001**	1.4E-05	9.5E-06	8.7E-05	8.7E-06	**0.00003**
28/01/02 21/02/02	4.2E-06	2.3E-06	7.7E-06	2.3E-06	1.9E-06	9.2E-07	5.1E-05	**0.00001**	3.2E-05	9.3E-06	0.00018	0	**0.000073**
21/02/02 12/03/02	2E-05	5.3E-06	9E-06	7.9E-06	8.5E-06	6.3E-06	2.3E-05	**0.000011**	3.4E-05	5.7E-06	0.00017	1.3E-05	**0.000055**
12/03/02 09/04/02	0	0	9.7E-05	0.0001	4.5E-05	6.1E-05	0	**0.000076**	0.00028	1E-05	0.00049	2.3E-05	**0.000202**
09/04/02 30/04/02	0	7.4E-06	6.9E-06	3.6E-06	1.5E-05	1.1E-05	0	**0.000009**	6.9E-05	4E-05	0.00028	9.4E-05	**0.000122**
30/04/02 16/05/02	0	0	0	0	0.00012	0.00035	0	**0.000238**	0.0006	4.7E-05	0.0101	0.00022	**0.00274**
16/05/02 04/06/02	0	2.3E-06	3E-06	0	2.8E-06	3.1E-06	0	**0.000003**	3E-05	4.7E-06	0.00092	3.6E-05	**0.000248**
04/06/02 25/06/02	1.7E-05	9.3E-06	3.9E-06	1.6E-05	9.3E-06	5.5E-06	1.7E-05	**0.000011**	5.8E-05	1.4E-05	0.00099	3.2E-05	**0.000273**
25/06/02 16/07/02	3E-05	9.6E-06	1.5E-05	1.5E-05	4.4E-06	5.3E-06	1.6E-05	**0.000014**	8.1E-05	3E-05	0.00114	5.9E-05	**0.000328**
16/07/02 13/08/02	3.9E-05	1.2E-05	5.4E-06	3E-05	4.5E-05	8E-06	3.8E-05	**0.000025**	5.1E-05	2.2E-05	0.00037	2.5E-05	**0.000117**
13/08/02 27/08/02	0.00013	3E-05	8.8E-06	7.9E-05	1.3E-05	3.4E-05	0.00013	**0.00006**	0.00059	0.00011	0.00138	0.00041	**0.000622**
27/08/02 26/09/02	1.3E-05	1.5E-05	1.2E-05	2E-05	1.2E-05	1E-05	1.9E-05	**0.000014**	0.00044	1E-05	0.00027	3.4E-05	**0.000188**
Mitjana diària trampa	**0.00004**	**0.00004**	**0.00005**	**0.00004**	**0.00005**	**0.00019**	**0.00014**		**0.00015**	**0.00003**	**0.00109**	**0.00009**	

Taxa mitjana de retrocés diària PS: 0,000077 mm dia -1

Taxa mitjana de retrocés diària SA: 0.00034 mm dia -1

Taula 2. Valors obtinguts i càlculs de taxes de retrocés diàries de les trampes instal·lades a sa Punta des Sabinar (PS) i s'Alavern (SA), per a cada un dels períodes de mostreig i taxa mitjana de retrocés diari. Els períodes amb valor zero no s'han comptabilitzat a l'hora de realitzar les mitjanes.

Table 2. *Mean erosion daily rates calculated since sediment collected in sediment traps installed at sa Punta des Sabinar (PS) and s'Alavern (SA). Sampling periods with zero have not been counted to calculate arithmetic mean.*

extensió de 33.800 cm^2 a SA 1, 35.420 cm^2 a SA 2, 28.380 cm^2 a SA 3 i 37.840 cm^2 a SA 4. Les taxes mitjanes de retrocés calculades per a cada una de les trampes de sediment instal·lades en aquesta zona són:

•La trampa SA 1 presenta una taxa d'erosió anual de 0,054 mm any $^{-1}$. Els màxims valors d'erosió s'han donat durant els mesos d'abril, maig, agost i setembre (2002). Els mínims s'han donat a desembre, gener i la segona quinzena de maig (Taula 1).

•La trampa SA 2 ha enregistrat un retrocés de 0,011 mm any $^{-1}$. La màxima erosió ha tingut lloc durant els mesos d'octubre, novembre i agost. Els valors mínims durant la segona quinzena dels mesos de març i maig (Taula 1).

•La trampa SA 3, és la que presenta la major taxa de retrocés amb 0,33 mm any $^{-1}$, les majors taxes d'erosió han tingut lloc durant els mesos de novembre, maig, juny, juliol i agost. Les menors taxes s'han enregistrat durant la segona quinzena de novembre i primera de desembre i durant gener (Taula 1).

•La trampa SA 4 te una taxa de retrocés de 0,077 mm any $^{-1}$ i els majors valors de retrocés s'han enregistrat durant octubre, novembre, maig i agost. Els mesos de gener i març són els que han presentat uns valors de retrocés més baixos (Taula 1).

Tant a l'àrea de Punta des Sabinar com de s'Alavern, els valors de les taxes de retrocés diari (TDR), segueixen les mateixes pautes (Taula 2) que les taxes brutes de retrocés (TBR) i les taxes de retrocés anuals (Taula 1).

Els valors mitjans de retrocés dels penya-segat a partir dels processos de disgregació granular contínua són de 0,025 mm any $^{-1}$ per a Punta des Sabinar i de 0,117 mm any $^{-1}$ per a s'Alavern. Malgrat les diferències en el grau de retrocés, ambdues àrees coincideixen en els moments de màxim retrocés que s'han donat durant els següents períodes: 30/10/01-19/11/01, 17/12/01-07/01/02, 12/03/02-09/04/02, 30/04/02-16/05/02, 13/08/02. Aquests períodes de màxim retrocés del penya-segat, a excepció del comprès entre el 17/12/01-07/01/02, coincideixen amb els valors de màxima precipitació esmentats a l'apartat de climatologia (Fig. 5).

Característiques del material recollit

El material recollit a les trampes de sediment, varia quant a textura i granulometria per a cadascuna de les àrees d'estudi. El material de Punta des Sabinar correspon, principalment, al del Complex de Manglar, aquests clastes tenen una morfologia aplanada, en forma d'escates (Fig. 6) i presenten un elevat grau de classificació amb una tendència a contenir un baix percentatge de material lutític, excepte a les trampes PS 6 i PS 7 (Fig. 7). En canvi, els materials recollits a les trampes de sediment de s'Alavern presenten una ampla varietat de formes i mides (graves i còdols) (Fig. 6); la proporció dels sediments de textura lutítica tenen un major protagonisme, amb un menor grau de classificació que els sediments recollits a Punta des Sabinar (Fig. 7). Aquesta diferència granulomètrica i textural manté una estreta relació amb la presència, a la

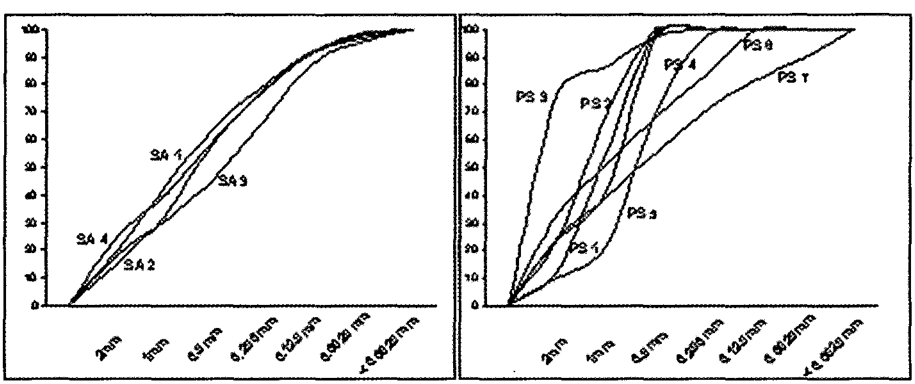


Fig. 7. Corbes granulomètriques acumulatives dels sediments recollits el 19/11/01.
Fig. 7. Particle size distribution of sediments collected on 19/11/01.

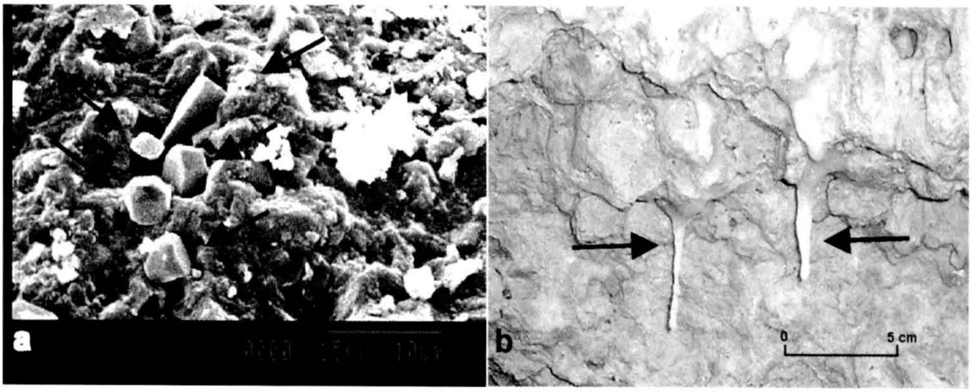


Fig. 8. a) Presència de cristalls d'halita a l'interior d'eolianites exposades a la zona d'influència de l'esprai marí. Extret de Gómez-Pujol *et al.* (2002); b) Precipitacions en forma d'estalactites, de sals a partir de la percolació d'aigua salada infiltrada dins del penya-segat. Fotografia realitzada als penya-segats de Punta des Sabinar, en un voladís situat a 10 m d'altura, prop de la trampa PS 6 (Fig. 2c).

Fig. 8. *a) Halite crystals inside eolianites exposed on spray zone. From Gómez-Pujol* et al. *(2002); b) Salt precipitation from sea water percolated throught the cliff rocks. Photo of an overhang (10 m height) of Punta des Sabinar cliffs, near sediment trap PS 6 (Fig. 2c).*

zona de s'Alavern, dels nivells superiors del penya-segats d'edat Plio-quaternària, donada la semblança entre els materials recollits a les trampes i els nivells de paleosòls i encrostraments.

Discussió i conclusions

Cal assenyalar una sèrie d'aspectes que s'han de considerar alhora de la ponderació dels valors estimats d'erosió continua. Aquests valors estan referits a una determinada superfície vertical del penya-segat, que presenta unes determinades variables litològiques i dins d'un ambient microclimàtic molt complex. En referència al primer punt, és evident que no tot el material particulat que és després de la superfície considerada cau dins la trampa col.locada al seu peu. De totes maneres a efectes pràctics ho hem considerat així tot i ser una simplificació i considerant que així com, per una banda el vent pot desplaçar el material cap a un costat, suposem que en la mateixa proporció (o molt aproximada) aportarà també material de la paret propera a l'àrea considerada inicialment.

En quant a les variables litològiques s'ha de tenir en compte que el model proposat a l'apartat de mètode (Fig. 4) considera una superfície de mostreig homogènia tant pel que fa a litologia i topografia de les superfícies de retrocés. La realitat difereix una mica del model considerat (Fig. 2a, 2b i 2c) ja que els materials que conformen els penya-segats de les àrees d'estudi presenten una alternança entre calcàries, margocalcàries i calcarenites corresponents al Miocè Superior i Plioquaternari. Així com també, les superfícies de mostreig presenten perfils topogràfics abruptes. En quant a les variables climatològiques cal assenyalar que la variable vent no s'ha tingut en compte degut a la dificultat d'obtenció i d'interpretació dels valors de la seva intensitat per a cada una de les estacions climatològiques, la principal dificultat radica en la relació entre intensitat del vent i les característiques de l'onatge. En l'actualitat es treballa sobre aquest aspecte ja que es considera tant a l'onatge com al vent els principals factors que possibiliten la deposició de les sals, mitjançant l'esprai marí, a les parets dels penya-segats. També s'ha d'afegir la dificultat que representa la complexe topografia del penya-segat alhora de modelitzar l'acció del vent en aquest punt.

El volum de material alliberat dels penya-segats de l'àrea de Punta des Sabinar és quatre

vegades menor que els de l'àrea de s'Alavern. La presència de nivells d'encrostaments calcaris i paleosòls a la part superior dels penya-segats de s'Alavern (Fig. 2a), amb un menor grau de cohesió i resistència que les calcarenites del Complex Terminal, pareix ésser-ne el principal factor. La textura i composició dels sediments així ho demostren.

S'observa una relació directa entre el volum de material alliberat en un període concret i els valors de precipitació; les majors taxes d'erosió i retrocés dels penya-segats es donen durant els períodes amb majors valors de precipitació (Fig. 5). L'acció de les sals pareix ésser el principal mecanisme de meteorització quimioclàstica dels penya-segats, que acaba per donar lloc a la seva descamació. Les sals es dipositen a l'interior de les microfractures els dies de tempestes marines. Així ho demostra la presència de cristalls d'halita (Fig. 8a) a l'interior de les eolianites que formen els carreus de la Torre d'en Beu, localitzada a la part superior dels penya-segats de la zona de Cala Figuera (Santanyí) (Gómez-Pujol *et al.*, 2002). També s'ha pogut constatar la precipitació de sals a partir de l'aigua, amb una elevada concentració de sals, infiltrada dins dels penya-segats (Fig. 8b).

L'orientació E-W dels espadats de s'Alavern permet que rebin una major insolació que els penya-segats de Punta des Sabinar d'orientació SW-NE. El grau d'incidència de la insolació pot ésser traduït en un augment de la temperatura dels materials que constitueixen els penya-segats, fent possible l'acció d'algunes sals i processos mecànics de ciclicitat contracció-expansió tèrmica (Davison, 1986; Goudie i Viles, 1997; Holmer, 1998).

És possible que els períodes amb la màxima activitat erosiva per part de les sals no es reflecteixi en la quantitat de material dipositat a l'interior de les trampes. L'expansió tèrmica i el creixement de cristalls de sals a l'interior de les microfractures durant els períodes secs (Moses i Smith, 1994), pot donar lloc a la formació de material laminar, graves i petits còdols. Aquests poden ésser alliberats durant els dies de pluja, mitjançant el rentat de les parets dels penya-segats afectats (Holmer, 1998).

Agraïments

Aquest treball és una contribució al Projecte de la Unió Europea MAS3-CT98-0173 *(European Shore Platform Erosion Dynamics)* i al Projecte de la DGI, BTE2002-04552-C03-02. Es vol agraïr la col·laboració i ajuda de D. Pere Bover, D. Joan Miquel Carmona, D. Lluís Gómez-Pujol i del Dr. Bernadí Gelabert. L'autor Pau Balaguer és becari del programa FPI de la Conselleria d'Innovació i Energia del Govern Balear.

Bibliografia

Balaguer, P., Fornós, J.J. i Gómez-Pujol, Ll. 2001. Evaluation of erosion rates by granular disintegration in the Upper Miocene calcarenite sea-cliffs of eastern Mallorca (W-Mediterranean). Actes European Rock Coasts 2001. Brighton.

Balaguer, P., Fornós, J.J. i Gómez-Pujol Ll. 2002. Retroceso de los acantilados del Mioceno Superior en la costa del sureste de Mallorca: los casos de s'Estret d'es Temps i s'Alavern. In: Serrano, E., García de Celis, A., Morales, C.G. i Ortega, M.T. (Eds.): Estudios recientes (2000-2002) en geomorfología. Patrimonio, montaña, dinámica territorial. Actas VII Reunión Nacional de Geomorfología: 341-350. Valladolid.

Barón, A. 1977. *Estudio Estratigráfico y paleontológico del Mioceno Medio y superior post-orogénico de la Isla de Mallorca.* Premio Ciutat de Palma (Inédito). 180 pp.

Barón, A. i Pomar, L. 1978. Recent distribution of Neogene sedimentation areas of the mediterranean; area 405: Balearic Depression. IGCP project n° 25 (UNESCO, IUGS).

Blanco-Chao, R. i Pérez-Alberti, A. 1996. Formas litorales en la costa noroccidental gallega: Los sectores acantilados entre Cabo Prioriño (Ferrol) y Punta Frouxeira (Valdoviño). *Geographicalia,* 33: 3-28.

Corbí, A.M. 1990. Geomorfologia del sistema dunar de sa Mesquida (Capdepera) a l'illa de Mallorca. In: Universitat de les Illes Balears i Soc. Hist. Nat. Balears (Eds.): *II Jornades del Medi Ambient de les Illes Balears*: 40-41. Palma de Mallorca.

Davison, A.P. 1986. An investigation into the relationship between salt weathering debris production and temperature. *Earth surface processes and landforms,* 11: 335-441.

Erismann, T.H. i Abele, G. 2001. *Dynamics of rockslides and rockfalls.* Ed. Springer. Berlin. 316 pp.

Fornós, J.J. 1983. *Estudi sedimentològic del Miocè Terminal de l'illa de Mallorca.* Tesi de Llicenciatura. Universitat de Barcelona. Inèdit.

Fornós, J.J. 1999. Karst collapse phenomena in the Upper Miocene of Mallorca (Balearic Islands, Western Mediterranean). *Acta Geologica Hungarica*, 42 (2): 237-250.

Fornós, J.J., Ginés, A., Ginés, J. i Pomar, L. 1990. Paleokarst collapse breccias in the Uppermost Miocene of Mallorca (Spain). In: Soc. Hist. Nat. Balears i Universitat de les Illes Balears (Eds.): *II Jornades del Medi Ambient a les Balears*: 46-47. Palma de Mallorca.

Ginés, J. 2000. *El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología.* Tesi Doctoral. Universitat de les Illes Balears. Palma de Mallorca. 595 pp.

Gómez-Pujol, Ll., Balaguer, P. i Fornós, J.J. 2002. Meteorización del patrimonio histórico en ambientes costeros marinos: el caso de la Torre d'en Beu (Santanyí. Mallorca). In: Serrano, E., García de Celis, A., Morales, C.G. i Ortega, M.T. (Eds.) : *Estudios recientes (2000-2002) en geomorfología. Patrimonio, montaña, dinámica territorial.* Actas VII Reunión Nacional de Geomorfología: 403-413. Valladolid.

Goudie, A. i Viles, H.A. 1995. The nature and pattern of debris liberation by salt weathering: A laboratory study. *Earth surface processes and landforms*, 20: 437-449.

Goudie, A. i Viles, H.A. 1997. *Salt weathering hazards.* Edited by John Wiley i Sons. Chichester, UK. 241 pp.

Guijarro, J.A 1986. *Contribución a la bioclimatología de Baleares.* Tesi Doctoral. Universitat de les Illes Balears.

Holmer, B. 1998. Flaking by insolation drying and salt weathering on the Swedish west coast. Z. *Geomorph.* N. F., 42. 1: 39-55.

Lluch, F.D. 1997. Geografia de les Illes Balears. Lleonard Muntaner Editor. Palma de Mallorca. 337 pp.

Marques, F.M. 1997. Sea cliff retreat in Portugal: Overview of existing quantitative data. Actas do V Congreso Nacional de Geologia: 75-78.

Martín, J.A. i Rodríguez-Perea, A. 1996. Participación vegetal en la construcción de los sistemas dunares litorales de Mallorca. In: Granal, A i Pagés, L. (Eds.): Lab. Xeolóxico de Laxe-Sociedad Española de Geomorfología. *Cuadernos*: 785-800. A Coruña.

Moses, C.A. i Smith, B.J. 1994. Limestone weathering in the supra-tidal zone: An example from Mallorca. In: Robinson, D. i Williams, R.G.B (Eds): Rock *Weathering and Landform Evolution*: 433-451.

Palmer, M., Villanueva, G., Pons, G.X., Fornós, J.J., Balaguer P., Vidal, M. i Gómez-Pujol, Ll. 2001. Primeres estimes a les Balears de la taxa de bioerosió (g m-2 any-1) del litoral rocós: descripció de l'estratègia general d'anàlisi de dades. *In:* Pons, G.X. (Ed): *III Jornades del Medi Ambient de les Illes Balears*: 76. Palma de Mallorca.

Pomar, L., Marzo, M. i Barón, A. 1983. El Terciario de las Baleares. *Guía de las excursiones del X Congreso Nacional de Sedimentología*: 21-44. Menorca.

Robledo, P. 2001. El Paleokarst del Levante de Mallorca. Memòria d'Investigació. Universitat de les Illes Balears. Inèdita. 128 pp.

Rodríguez-Perea, A., Servera, J. i Martín, J.A. 2000. *Alternatives a la dependència de les platges de les Balears de la regeneració artificial continuada: Informe Metadona.* Universitat de les Illes Balears i Ajuntament de Calvià (Eds.). Palma de Mallorca. 108 pp.

Servera, J. 1997. *Els sistemes dunars litorals de les Illes Balears.* Tesi Doctoral. Inèdita. Palma de Mallorca. 595 pp.

Servera, J. i Martín, J.A. 1996. Análisis y causas del retroceso de la línea de costa del arenal de sa Ràpita (Mallorca). *In*: Granal, A i Pagés, L. (Eds.): Lab. Xeolóxico de Laxe-Sociedad Española de Geomorfología. *Cuadernos*: 877-890. A Coruña.

Servera, J. i Rodríguez-Perea, A. 1996. Morfologías parabólicas de los sistemas dunares litorales de Baleares. *In:* Granal, A i Pagés, L. (Eds.): Lab. Xeolóxico de Laxe-Sociedad Española de Geomorfología. *Cuadernos*: 645-658. A Coruña.

Sunamura, T. 1992. *Geomorphology of rocky coasts.* Edited by Jonh Wiley i Sons. Chichester, UK. 302 pp.

Trenhaile, A. 1987. *The geomorphology of rock coasts.* Clarendon Press (Ed.). Oxford. 384 pp.

Villanueva, G., Balaguer P., Baldo, M., Fornós, J.J., Gómez-Pujol, Ll. i Pons, G.X. 2000. Importancia de la bioerosión en la evolución del litoral rocoso: efecto de *Melaraphe neritoides y Monodonta turbinata* en el litoral de Mallorca y norte de Catalunya. *Geotemas*, 1 (4): 299-302.